

板料成形

汽车覆盖件模面设计中的复杂大孔洞填充算法

李 行, 章志兵, 柳玉起, 王 振

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了解决汽车覆盖件模面设计中复杂大孔洞填充的质量问题, 提出了基于能量优化网格和分区曲面拟合的孔洞填充算法。该算法利用控制线对孔洞进行拓扑分区, 降低大孔洞的填充难度; 采用网格预填充和分区曲面拟合的方法, 间接构造填充曲面, 提高了复杂孔洞填充的稳定性; 采取分区三角剖分和整体网格优化的策略构造补孔网格, 生成的网格兼具整体光顺性和分区独立性, 保证后续分区拟合曲面的正确性。采用该算法对实际汽车覆盖件零件进行了孔洞填充测试, 结果表明, 该算法生成的填充曲面质量好且满足边界处的 G0 连续。提出的算法支持基于控制线自动分区构造填充曲面, 填充的稳定性和质量好, 适合复杂线框孔洞的填充, 具有工程应用价值。

关键词: 孔洞填充; 控制线; 区域分割; 网格模型; 汽车覆盖件

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.006

中图分类号: TG386.3; TP319 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 01-0053-06

Filling algorithm on complex large hole in die face design for automotive cover panels

Li Xing, Zhang Zhibing, Liu Yuqi, Wang Zhen

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology,
Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to solve the problem of filling quality for complex large holes in die face design of automotive panels, a hole filling algorithm based on energy optimization mesh and partition surface fitting was proposed, which used control lines to partition the holes topologically to reduce the difficulty of filling large holes. Then, the filling surfaces were constructed indirectly to improve the stability of complex hole filling by using the method of mesh pre-filling and partition surface fitting. Furthermore, the strategy of partition triangulation and overall mesh optimization was adopted to construct the patching mesh, and the generated mesh had both overall smoothness and partition independence, which ensured the correctness of the subsequent partition fitting surfaces. Finally, the algorithm was used to test the hole filling of the actual automotive panels. The results show that the filling surface generated by the algorithm is of good quality and meets G0 continuity at the boundary. The proposed algorithm supports the automatic partition construction of filling surfaces based on control lines, which has good filling stability and quality. Moreover, the proposed algorithm is suitable for filling complex wireframe holes, and has engineering application value.

Key words: hole filling; control line; region segmentation; mesh model; automotive panel

汽车覆盖件模面设计中, 补孔操作是将产品孔和设计产生的工艺孔进行有效的填补, 使模面成为一个无缝隙的整体^[1]。补孔可以有效提高模型的网格质量, 对后续的汽车覆盖件的成形仿真

十分重要。

传统的补孔操作主要依靠通用 CAD 平台提供的曲面填充工具, 这些工具对于简单孔洞的填充, 基本上能取得不错的效果; 但对于复杂孔洞的填充, 则存在填充的稳定性差、填充面的质量不佳等问题。目前, 一些板料 CAE 软件的集成模面设计模块也可以进行补孔操作, 补孔的稳定性较高, 但是存在孔洞边界的网格质量难以优化的缺点。为了优化补孔效果, 有必要对覆盖件的孔洞填充方法展开研究。

收稿日期: 2022-04-20; 修订日期: 2022-07-19

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2021B0101220001)

作者简介: 李 行 (1997-), 男, 硕士

E-mail: itslixing@163.com

通信作者: 章志兵 (1978-), 男, 博士, 副教授

E-mail: zhangzb@hust.edu.cn

刘志国等^[2]提出了一种虚拟曲面填充方法,该方法通过处理环特征来消除内孔,通过延展曲面来填补零件边界上的外孔,并不实际生成曲面;刘瑞军等^[3]针对多面孔的情况,提出了采用双三次 Coons 曲面补孔的方法。这些方法实现了孔洞的快速自动填充,但是均存在复杂大孔洞填充效果不佳的问题。

复杂大孔洞填充主要有两方面的问题:(1)由于孔洞尺寸大,填充曲面的形态难以控制;(2)对于边界复杂的大孔洞,填充曲面会非常复杂,且难以保证其质量和误差。因此,设计人员在处理复杂大孔洞时,一般均会引入控制线,以调控填充曲面的形态,优化填充效果。

本文针对包含控制线的复杂大孔洞填充问题,提出了一种基于能量优化网格和分区曲面拟合的孔洞填充算法。该算法首先构造光顺的补孔网格模型,然后再由网格模型拟合 NURBS 曲面,提高了求解的稳定性。同时,该算法对线框孔洞进行了拓扑分区,分区不仅降低了求解的复杂度,而且简化了单张填充曲面,提高了填充曲面的质量。

1 线框孔洞

孔洞,是由边界线包围的封闭区域。孔洞填充,就是构造若干张填充曲面覆盖孔洞区域,并满足边界上的连续性要求。包含控制线的孔洞,其边界线和控制线形成了线框结构,称为线框孔洞。线框孔洞主要包括:边界线、控制线和约束曲面,如图 1 所示。边界线须能顺序连成一个封闭的环,以限定孔洞的范围。控制线存在一条或多条,任意控制线的两端点不能悬空,须位于边界线或其他控制线上。控制线能够控制填充曲面的形状,同时也将孔洞区域自然地分隔为若干个

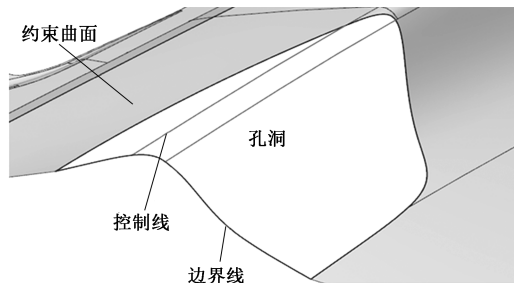


图 1 线框孔洞的几何模型

Fig. 1 Geometry model of wireframe-hole

子区域。约束曲面可有可无,其提供了孔洞边界上的法向约束条件。

2 关键技术

由于网格模型具有良好的几何拓扑适应性、局部控制性和数值稳定性等特点,使得求解网格模型相比于求解参数化曲面更加快速和稳定。基于能量优化网格和分区曲面拟合的孔洞填充算法,将孔洞填充分为构造补孔网格模型和网格模型拟合 NURBS 曲面两个阶段,通过网格预填充和分区曲面拟合的方法间接构造填充曲面。

2.1 算法流程

算法的关键是孔洞拓扑分区和构造补孔网格模型,分区的效果和网格模型的质量直接决定了最终填充的效果。

图 2 展示了算法的主要流程:第 1 步,依据线框孔洞的拓扑关系,对孔洞进行区域划分;第 2 步,统一离散孔洞的线框,并依据约束曲面布置边界约束单元,得到补孔网格模型的框架;第 3 步,对每一个区域分别进行三角剖分,得到无漏洞的初始网格模型;第 4 步,基于薄板能量优化法对网格模型进行整体优化,得到光顺的网格模型;第 5 步,基于网格模型分区拟合 NURBS 曲面。

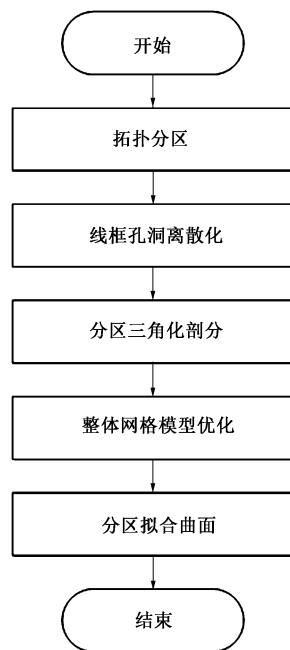


图 2 线框孔洞填充算法流程图

Fig. 2 Flow chart of wireframe-hole filling algorithm

2.2 线框孔洞拓扑分区

线框孔洞的基本几何元素有顶点、边和面,边

又可细分为边界线和控制线两种。线框孔洞的拓扑信息描述了各几何元素间的空间联系，主要包括：边界线和面、边和边、边和顶点之间的相互关系。线框孔洞的拓扑结构如图 3 所示。

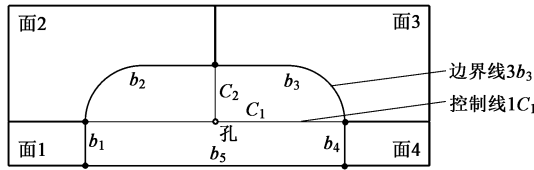


图 3 线框孔洞的拓扑结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wireframe-hole topology structure

区域是指由边首尾相连围成的环。基于孔洞的拓扑信息，可以对孔洞进行区域划分。本文提出了一种迭代划分区域的方法，该方法需要维护两个集合——区域集合 $\{A\}$ 和控制线集合 $\{C\}$ 。初始时， $\{A\}$ 中只有一个由孔洞的边界线组成的区域； $\{C\}$ 是由孔洞的所有控制线组成的集合。该方法的主要步骤可以描述为：

步骤 1：判断 $\{C\}$ 是否为空。若是，则表示区域划分结束；否则，继续步骤 2。

步骤 2：按序遍历 $\{C\}$ ，判断 C_u 的两个端点是否位于同一区域的 A_v 边上。若是，继续步骤 3；否则，继续遍历 C_{u+1} 。其中， C_u 为 $\{C\}$ 中的第 u 条控制线， A_v 为 $\{A\}$ 中的任一区域。

步骤 3：如果 C_u 能分割 A_v 的边，则此边被替换为分割得到的多条分段边，并更新 $\{A\}$ 中包含该边的区域。

步骤 4：对区域 A_v 进行划分，得到两个由 A_v 划分而来的子区域 A_{w+1} 和 A_{w+2} 。其中， w 为 $\{A\}$ 中所有区域的最大编号。

步骤 5： $\{C\}$ 中移除 C_u ， $\{A\}$ 中移除 A_v ，添加 A_{w+1} 和 A_{w+2} 。回到步骤 1。

该方法简洁直观，易于实现，能正确地划分区域，且所有区域的方向一致。利用上述方法对图 3 中的线框孔洞进行区域划分，分区结果如图 4 所示。其中， $S_1 \sim S_8$ 为组成区域的分段线，由边界线和控制线演化而来。

2.3 线框孔洞离散化

原始的线框孔洞是由曲线和曲面表达的连续模型，构造网格模型前，首先需要将线框孔洞离散化。线框孔洞的离散化，包括曲线离散化和布置边界约束单元两方面。

曲线离散化，是通过离散数据点组成的折线段

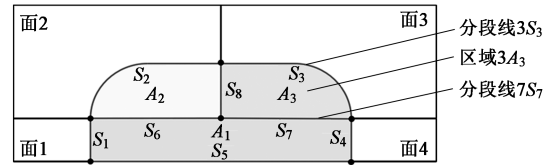


图 4 拓扑分区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of topological partition

来逼近原始曲线。常用的曲线离散方法有等弧长离散、等弦高离散和等弦长离散等。通过等弦长离散方法获得的离散数据点分布均匀，但是会错过曲率较高的区域。等弦高离散方法获得的离散数据点自适应分布，冗余点少，但是存在曲率较高处线段过短的问题^[4]。本文采用的曲线离散方法，主体基于等弦长离散方法，同时考虑弦高容许值和角度容许值两个控制参数。该方法可以较好地逼近原始曲线，在曲率较高处的离散数据点相对密集，但离散数据点整体趋向均匀。

运用上述曲线离散方法，对拓扑分区分段线离散后，可以得到一系列的离散数据点。这些离散数据点经过合并、去重和统一编号后，构成了网格模型的初始顶点集合 $V = \{V_r\}$ ， $r = 1, 2, \dots, n$ ， V_r 为网格中编号为 r 的顶点， n 为顶点总个数。拓扑分区后的区域，可以定义为由顶点序列组成的封闭多边形，区域 $A = \{P_s, P_s \in V\}$ ， P_s 为组成区域 A 中编号为 s 的顶点。

布置边界约束单元，是通过在网格模型的边界添加单元来近似表达孔洞边界的曲面约束。其基本思路为：对每一条存在曲面约束的边，均构造一个位于孔洞外侧的三角形单元。具体在布置单个约束单元时，要添加一个位于孔洞外侧的顶点。该顶点可以通过偏置的方法得到，偏置的原点取边的中点，偏置的方向取边的切向与边的平均法向的叉乘方向。

如图 5 所示，对边 E_{ij} 布置约束单元时，添加了新顶点 V_k ，构造了约束三角形单元 T_{ijk} 。其中 i, j, k 表示组成边或三角形的网格顶点的编号。添加约束单元后，需要将新增的顶点 V_k 加入网格模型的顶点集合 V ，将 T_{ijk} 加入网格模型的单元集合 $T = \{T_{ijk}\}$ 。边界约束单元布置完成后，即得到了离散线框孔洞模型。

2.4 线框孔洞网格模型构造

线框孔洞离散化后，得到的是网格模型的框架，存在一个或多个待填补区域。三角形网格孔洞修补是数字几何处理中的重点问题，目前的方法有波前

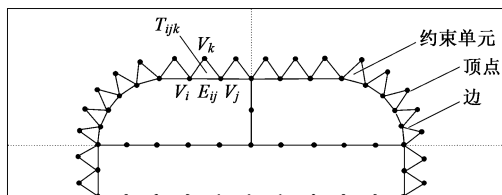


图 5 线框孔洞的离散化模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of wireframe-hole discretized model

法、插值细分法、区域分割法等^[5-11]。本文拓展了 Liepa P^[12] 和 Zou M 等^[13] 的思想, 提出了一种分区三角剖分和整体网格优化的策略, 对孔洞进行光滑填补, 构造光滑的补孔网格模型。

分区三角剖分, 是指分别对每个区域的三维多边形进行三角剖分, 区域间相互独立。三角剖分可以描述为: 对于一个封闭的 3D 多边形 G , 三角剖分的目标是寻找一个最优的内部三角形集合 T_{opt} , 组成一个拓扑流形曲面, 填满由 G 围成的封闭区域 D , 并且满足用户自定义的最小权重规则。图 6 展示了两种不同的三角剖分形式。

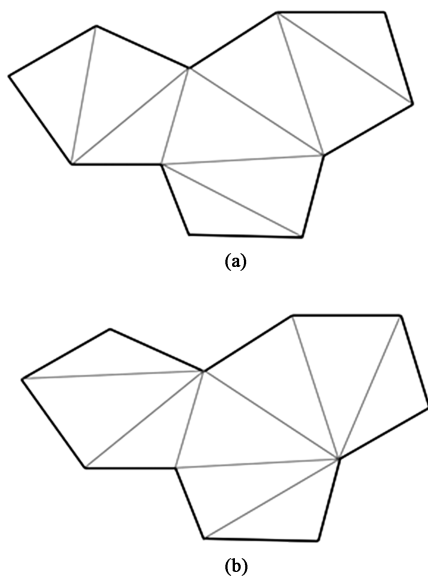


图 6 相同多边形的不同三角剖分方式

(a) 方式 1 (b) 方式 2

Fig. 6 Different triangulation methods of the same polygon

(a) Method 1 (b) Method 2

本文采用了 Barequet G 等^[14] 提出的三角剖分方法, 其基本思想为“分治”: 多边形 G 的最优三角剖分是通过合并两个由 G 拆分的子多边形的最优三角剖分形成的, 通过分治的方法减小问题的规模, 并进行递归求解。分区三角剖分后, 得到了无漏洞的初始三角形网格模型, 包含所有区域的填充单元

和边界的约束单元, 如图 7 所示。

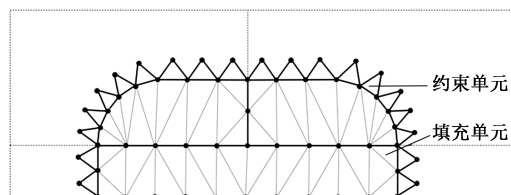


图 7 三角剖分后的初始网格模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of initial mesh model after triangulation

整体网格优化, 是对三角剖分后的初始网格模型进行优化重构, 使得网格模型趋向光滑, 且在孔洞边界及区域交界处光滑过渡。本文采用 Yoshizawa S 等^[15] 提出的方法, 优化三角形网格模型的形状; 该方法将弹性薄板能量优化法推广至三角形网格, 结合网格演化方法和网格细化, 可以生成高质量的光滑网格模型。同时, 网格优化过程中, 边界线、控制线及边界约束单元上的顶点应始终保持不动。这主要有两方面的考虑: (1) 边界约束单元表示孔洞边界的曲面约束, 曲面约束不能被改变; (2) 边界线和控制线上的顶点保持不动, 则区域的多边形顶点序列也不变, 且优化的网格模型不存在跨越多个区域的三角形单元, 这就保证了每个区域的独立性, 对后续按区域提取三角形单元、分区拟合曲面十分有利。图 8 展示整体网格优化后, 得到的光滑补孔网格模型。

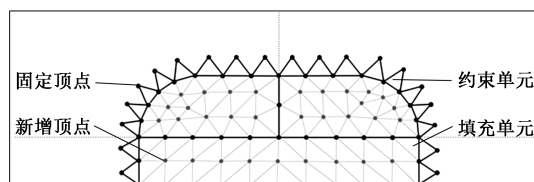


图 8 整体网格优化后的光滑补孔网格模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of smooth mesh model for filling hole after overall mesh optimization

3 应用实例

为了验证算法的有效性和准确性, 已在 30 多个实际汽车覆盖件零件上完成了孔洞填充测试。测试结果表明, 该算法能够稳定地填充不同尺寸和复杂程度的孔洞。图 9 展示了汽车后背门内板、侧围和翼子板上典型孔洞的填充结果, 可以看出, 所有填充曲面均不存在缺陷, 形态正常且外表光滑。

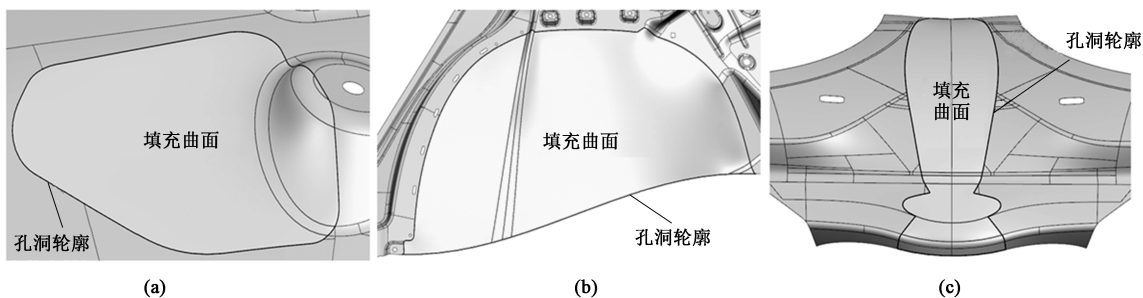


图 9 典型汽车覆盖件的孔洞填充结果

(a) 后背门内板 (b) 侧围 (c) 翼子板

Fig. 9 Hole filling results of typical automotive cover panels

(a) Back door inner panel (b) Body side (c) Fender

为了进一步评估算法的效果,选取了汽车侧围上的典型孔洞进行详细分析。图 10 展示了侧围外边界的凹陷区域处设计的外孔结构,孔洞内部包含两条控制线。该孔洞的尺寸较大,其最小包围盒的长度、宽度和高度分别为 241.4、145.8 和 76.9 mm。同时,由于该孔洞边界跨过了多个圆角面、直壁面等特征面,曲率变化剧烈且高度落差大,因此,该孔洞属于形状复杂的空间孔洞。



图 10 汽车侧围外边界上的孔洞

Fig. 10 Hole in outer boundary of body side for automotive

运用本文提出的算法进行孔洞填充,将该孔洞划分为 3 个子区域,分区三角剖分得到的初始网格模型如图 11 所示,整体网格优化后得到的光滑补孔网格模型如图 12 所示,分区曲面拟合后得到的填充

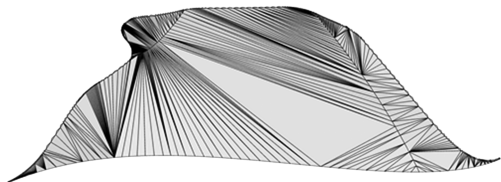


图 11 三角剖分后的初始网格模型

Fig. 11 Initial mesh model after triangulation

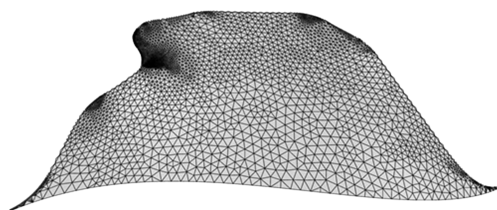


图 12 整体网格优化后的光滑补孔网格模型

Fig. 12 Smooth mesh model for filling hole after overall mesh optimization

曲面如图 13 所示。图 13 结果显示,生成的填充曲面均不存在曲面缺陷,整体形态和曲面质量较好,且各曲面间过渡良好,交界处不存在明显的棱线。图 14 为填充曲面的 G0 连续性分析云图,分析结果显示,所有填充曲面均满足曲面间的 G0 连续,其中最大的距离误差为 0.089 mm,小于设定的 G0 距离误差阈值 0.100 mm。

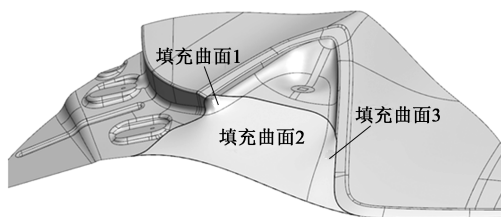


图 13 曲面拟合后的填充曲面

Fig. 13 Filling surfaces after surface fitting

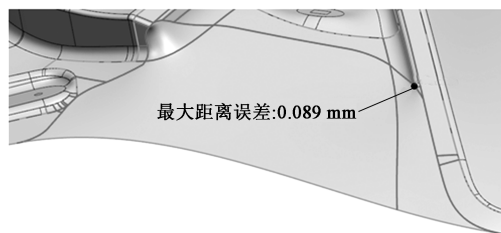


图 14 填充曲面的 G0 连续性分析云图

Fig. 14 G0 continuity analysis contour of filling surfaces

上述结果表明,该算法能够稳定地填充有控制线的复杂大孔洞,生成的填充曲面的形态质量好且在边界处能达到 G0 连续。虽然算法生成的填充曲面还不能达到更高的连续性,但也通过布置约束单元和网格优化等机制,保证了填充曲面与周围曲面过渡良好,因此,该算法生成的填充曲面能够满足覆盖件冲压成形仿真的要求。

4 结论

(1) 本文提出了一种基于能量优化网格和分区曲面拟合的孔洞填充算法,适合于填充复杂拓扑结构的线框孔洞,满足了大尺寸孔洞或形状复杂孔洞内部搭建控制线的设计需求。

(2) 提出了基于控制线对线框孔洞进行自动拓扑分区的方法。通过分区填充的方式,简化了填充难度,提高了填充质量。提出了通过网格预填充和分区曲面拟合的方法间接构造填充曲面,提高了填充的稳定性。

(3) 给出了连续线框孔洞的离散化方法,得到了线框孔洞的离散化模型。在此基础上,采用分区三角剖分技术和基于能量优化的整体网格优化技术,构造了光顺的高质量补孔网格,保证了分区拟合曲面的正确性。

(4) 已在 30 多个实际汽车覆盖件零件上进行了孔洞填充测试。结果表明,本文提出的算法填充稳定性好,生成的填充曲面形态质量佳,在边界处能达到 G0 连续,填充复杂大孔洞的效果好。

参考文献:

[1] 狄驰. 基于 CAE 的覆盖件模面工程系统若干关键算法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
Di C. Several Key Techniques for CAE-based Die-face Design System [D]. Changchun: Jilin University, 2009.

[2] 刘志国, 胡平, 郭威. 汽车覆盖件成型仿真中虚拟曲面的填充技术研究 [J]. 汽车技术, 2007, (5): 37-41.
Liu Z G, Hu P, Guo W. Study on filling technology of virtual surface in forming simulation of automobile panel [J]. Automobile Technology, 2007, (5): 37-41.

[3] 刘瑞军, 宋玉泉, 胡平, 等. 基于 B_Rep 的汽车覆盖件曲面自动补孔算法 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39 (S2): 292-295.
Liu R J, Song Y Q, Hu P, et al. Filling holes algorithm for automobile panel based on B_Rep [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39 (S2): 292 -

295.

[4] 陶文. 曲线光顺算法研究与自动化修边镶块设计系统开发 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
Tao W. Research on Curve Smoothing Algorithm and Development of Automated Design System for Trim Steel [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016.

[5] 李松, 马聪聪, 陆帆, 等. 基于多向波前法的岛屿孔洞修补 [J]. 中国机械工程, 2019, 30 (20): 2473-2479.
Li S, Ma C C, Lu F, et al. Island hole repairing based on multi-directional advancing method [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30 (20): 2473-2479.

[6] 潘翔, 焦吾振, 郑河荣, 等. 结合插值细分和径向基函数的 3 维扫描数据孔洞修补 [J]. 中国图象图形学报, 2018, 23 (4): 564-571.
Pan X, Jiao W Z, Zheng H R, et al. Combining interpolated subdivision and radial basis function for filling 3D scanning data [J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 23 (4): 564-571.

[7] 王继伟, 张应中, 罗晓芳. 基于孔洞区域特征分割的复杂孔洞修复方法 [J]. 数字技术与应用, 2020, 38 (5): 54-56.
Wang J W, Zhang Y Z, Luo X F. Complex hole repair method based on hole region feature segmentation [J]. Digital Technology & Application, 2020, 38 (5): 54-56.

[8] 吴晓婧, 寿华好, 邵茂真. 用内法向量与二次误差度量修补三角网格孔洞 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32 (2): 239-245.
Wu X J, Shou H H, Shao M Z. Triangular mesh hole filling using inward normal and quadric error metric [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2020, 32 (2): 239 - 245.

[9] 华顺刚, 张晓帅. 结合有序边表法和径向基函数的点云孔洞修补 [J]. 软件工程与应用, 2020, 9 (1): 56-61.
Hua S G, Zhang X S. Point cloud hole repair combining ordered edge list method and radial basis function [J]. Software Engineering and Applications, 2020, 9 (1): 56-61.

[10] Agrawal V, Agrawal N. Hole filling method for triangular mesh generation [J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2019, 8 (7): 1271-1276.

[11] Feng C, Liang J, Ren M D, et al. A fast hole-filling method for triangular mesh in additive repair [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (3): 969-989.

[12] Liepa P. Filling holes in meshes [A]. Eurographics Symposium on Geometry Processing [C]. Aachen, 2003.

[13] Zou M, Ju T, Carr N. An algorithm for triangulating multiple 3D polygons [J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32 (5): 157-166.

[14] Barequet G, Dickerson M, Eppstein D. On triangulating three-dimensional polygons [J]. Computational Geometry, 1998, 10 (3): 155-170.

[15] Yoshizawa S, Belyaev A G. Fair triangle mesh generation with discrete elastica [A]. Geometric Modeling and Processing [C]. Saitama, 2002.